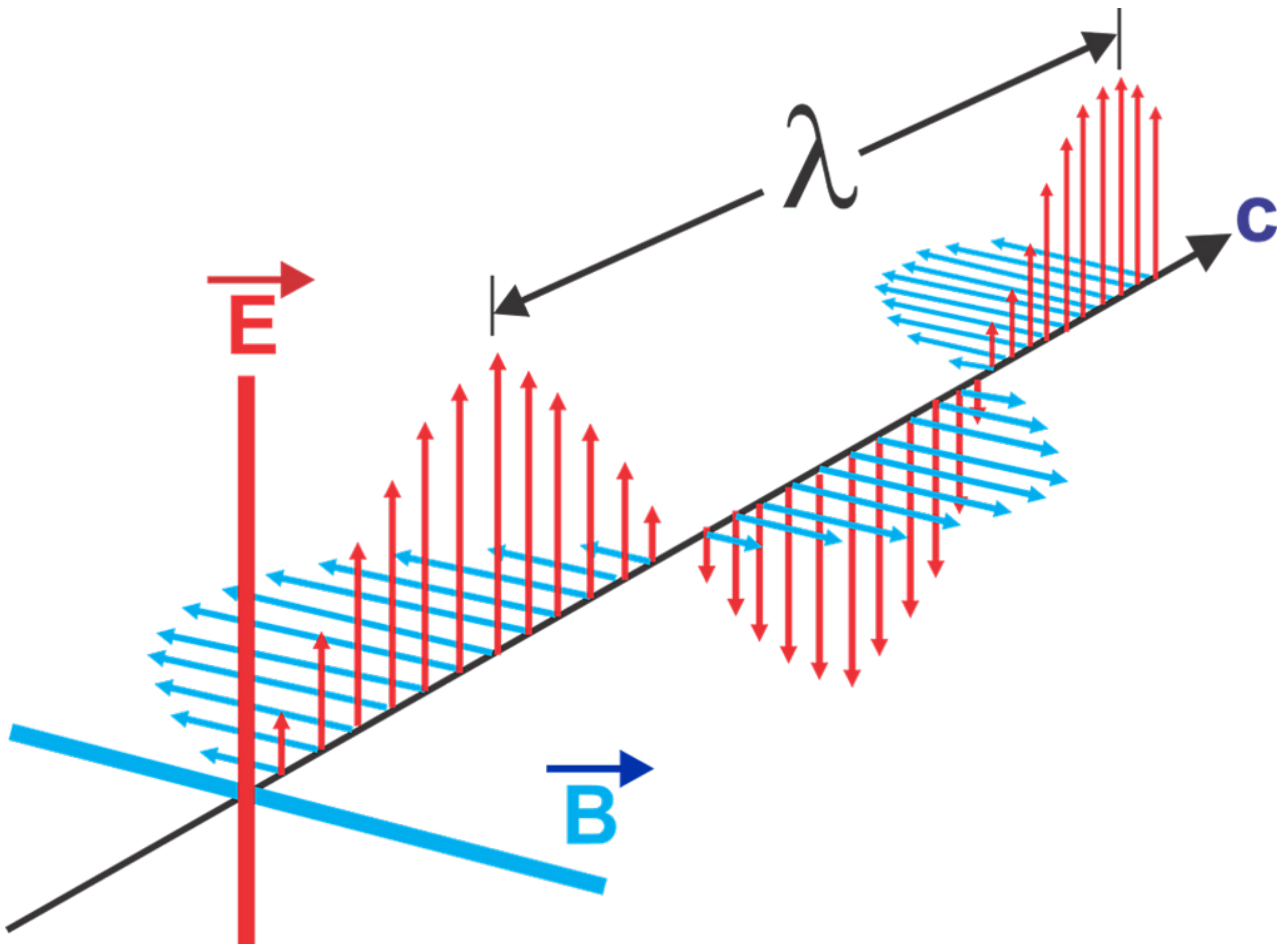
Ondas Electromagnéticas



Xavier Pardell

Contenido

BLOQUE 1 2
La idea de onda: cuando algo se mueve sin avanzar 2
Movimiento ondulatorio: energía en tránsito 3
Oscilación y equilibrio: el origen de toda onda 4
BLOQUE 2 5
Sonido, resonancia y vibración: cuando la onda se vuelve audible 5
Del sonido físico a la sensación sonora 6
Oscilación, frecuencia natural y resonancia 6
Vibraciones extremas: el fenómeno del flameo 7
BLOQUE 3 8
Clasificar las ondas: ordenar el movimiento para comprenderlo 8
Ondas gravitacionales: cuando vibra el espacio-tiempo 9
Nuevas ventanas de observación 11
BLOQUE 4 12
La luz: cuando la onda se hace visible 12
Propagación, reflexión y absorción 12
Difracción e interferencia: cuando la luz revela su naturaleza ondulatoria 13
La velocidad de la luz: un límite fundamental 14
Una dualidad inevitable 14
BLOQUE 5 15
El espectro electromagnético: una continuidad invisible 15
BLOQUE 6 19
Interferencia, difracción y ondas estacionarias: cuando las ondas se encuentran 19
Ondas estacionarias: vibración sin avance 20
Un lenguaje común para fenómenos distintos 21
Bibliografía 23

BLOQUE 1

La idea de onda: cuando algo se mueve sin avanzar

Una onda no es un objeto ni un cuerpo que viaja. Es, en esencia, una alteración, una pequeña ruptura del equilibrio que se desplaza y deja el lugar casi igual a como estaba. Algo ocurre en un punto y, sin que la materia lo acompañe, ese acontecimiento se propaga.

El ejemplo más sencillo es también uno de los más antiguos: una hilera de fichas de dominó colocadas de canto, una junto a otra. Basta empujar la primera para que caigan todas. Ninguna ficha avanza hasta el final, pero el impulso sí lo hace. Lo que se transmite no es la ficha, sino el efecto del empujón. En términos físicos, se ha propagado una onda.

Ese mismo principio gobierna fenómenos tan distintos como el sonido que atraviesa una habitación, las olas que se forman en la superficie del mar o la luz que viaja desde una estrella lejana hasta nuestros ojos. En todos los casos hay algo que cambia localmente y ese cambio se desplaza.

Desde el punto de vista físico, una onda es una perturbación local que se propaga a través de un medio material o incluso en el vacío. Puede tratarse de una deformación, una compresión, una vibración o una variación de un campo físico. La naturaleza concreta de la perturbación importa menos que su comportamiento: lo esencial es que el sistema responde oscilando alrededor de una posición de equilibrio mientras la energía avanza.

Cuando la propagación necesita un soporte material —como el aire en el caso del sonido o una cuerda en vibración— se habla de ondas mecánicas. En ellas, las partículas del medio no viajan con la onda: oscilan alrededor de su posición inicial y transmiten la perturbación a las vecinas. El aire no acompaña al sonido hasta el oído; simplemente vibra y vuelve a su estado inicial una vez que la onda ha pasado.

Existen, sin embargo, ondas que no requieren ningún medio material para propagarse. Son las ondas electromagnéticas, en las que lo que oscila no es la materia, sino la intensidad de campos eléctricos y magnéticos. Gracias a esta propiedad, la luz puede atravesar el espacio vacío que separa a la Tierra del Sol, y las señales de radio pueden viajar millones de kilómetros a través del espacio.

A pesar de sus diferencias, todas las ondas comparten un conjunto de comportamientos comunes que permiten describirlas con un mismo lenguaje físico. Este conjunto de rasgos recibe el nombre de comportamiento ondulatorio y constituye una de las ideas centrales de la física.

Movimiento ondulatorio: energía en tránsito

El movimiento ondulatorio es el proceso mediante el cual la energía se desplaza de un punto a otro sin que exista un transporte neto de materia. En cualquier punto del medio, la perturbación se manifiesta como una oscilación periódica alrededor de una posición de equilibrio.

Un péndulo que se balancea, una cuerda pulsada o una columna de aire que vibra dentro de un tubo muestran este tipo de movimiento. Cada partícula implicada se mueve hacia adelante y hacia atrás, arriba y abajo o de un lado a otro, pero siempre alrededor de una posición fija. La onda no arrastra el medio: lo hace oscilar.

Este carácter oscilatorio permite describir el movimiento ondulatorio mediante conceptos como amplitud, periodo y frecuencia. La amplitud mide la intensidad de la perturbación; el periodo, el tiempo que tarda el sistema en repetir un ciclo completo; y la frecuencia, el número de ciclos que se producen por segundo. Estas magnitudes no son abstracciones matemáticas: determinan cómo percibimos un sonido como fuerte o débil, grave o agudo, o una señal como estable o fluctuante.

En las ondas mecánicas, la velocidad de propagación depende de las propiedades del medio. En los gases, las vibraciones se transmiten mediante

choques entre partículas; en los sólidos, intervienen las fuerzas que mantienen unidas las estructuras del material. Por eso el sonido viaja más rápido en el acero que en el aire, y más rápido en el aire que en el vacío, donde no puede propagarse.

Las ondas electromagnéticas constituyen una excepción notable. En el vacío, todas se desplazan a la misma velocidad, una constante fundamental de la naturaleza. Esta velocidad no depende del movimiento de la fuente ni del observador, y marca un límite superior para la transmisión de información en el universo.

Oscilación y equilibrio: el origen de toda onda

En el corazón de todo fenómeno ondulatorio hay una oscilación. Oscilar significa desviarse de una posición de equilibrio y regresar a ella de forma repetida. Ese movimiento puede ser regular o irregular, amortiguado o sostenido, simple o complejo, pero siempre implica una alternancia entre extremos.

En un sistema ideal, una vez iniciada, la oscilación podría mantenerse indefinidamente. En la realidad, sin embargo, siempre existen fuerzas que disipan energía: rozamientos, resistencias internas, pérdidas térmicas. Estas fuerzas reciben el nombre de fuerzas amortiguadoras y explican por qué un péndulo acaba deteniéndose o una cuerda deja de vibrar si no se la excita de nuevo.

Cada sistema oscilante posee una frecuencia natural, determinada por sus características físicas. Un péndulo largo oscila más lentamente que uno corto; una cuerda tensa vibra con mayor frecuencia que una floja. Cuando un sistema recibe impulsos periódicos a su frecuencia natural, puede producirse un fenómeno conocido como resonancia, en el que pequeñas excitaciones generan oscilaciones de gran amplitud.

La resonancia no es solo un concepto teórico: explica desde el sonido de los instrumentos musicales hasta problemas graves en ingeniería, como vibraciones estructurales no deseadas. Comprenderla es fundamental para entender cómo se generan, se amplifican y se controlan las ondas.

BLOQUE 1 — Idea de onda y movimiento ondulatorio

- **Onda armónica (1D):**

$$y(x,t) = A\sin(kx - \omega t + \varphi)$$

- **Relaciones básicas:**

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \qquad \omega = 2\pi f, \qquad v = \frac{\omega}{k} = \lambda f$$

- **Ecuación de onda (1D):**

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

- **Velocidad en cuerda tensa (modelo típico):**

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

(T: tensión; μ: densidad lineal)

BLOQUE 2

Sonido, resonancia y vibración: cuando la onda se vuelve audible

El sonido es, quizá, la experiencia más cotidiana del movimiento ondulatorio. No se ve, no se toca, pero nos rodea constantemente. Basta un golpe seco, una cuerda pulsada o una voz que se eleva para que el aire comience a vibrar y esa vibración viaje hasta nuestros oídos.

Desde un punto de vista físico, el sonido es una onda mecánica que se propaga gracias a las compresiones y dilataciones sucesivas de un medio material. En el aire, las moléculas se acercan y se separan siguiendo el avance de la perturbación; en los líquidos y sólidos ocurre algo análogo, aunque con velocidades distintas. Sin medio material no hay sonido. El vacío es, por definición, silencioso.

Estas ondas sonoras son longitudinales: las partículas del medio oscilan en la misma dirección en la que se propaga la onda. Cuando una fuente sonora vibra,

genera regiones alternas de mayor y menor presión que avanzan a través del espacio como una secuencia ordenada de empujes microscópicos.

La velocidad a la que el sonido se propaga depende de las propiedades del medio. En el aire, a temperatura ambiente, es relativamente modesta; en los líquidos aumenta, y en los sólidos puede ser varias veces mayor. Esta diferencia explica por qué, al apoyar el oído sobre un raíl metálico, se puede escuchar un tren mucho antes de que el sonido llegue por el aire.

Del sonido físico a la sensación sonora

No toda onda sonora es percibida por el oído humano. Solo aquellas cuya frecuencia se encuentra aproximadamente entre los 20 y los 20 000 hercios producen sensación auditiva. Por debajo de ese rango se habla de infrasonidos; por encima, de ultrasonidos. Ambos existen físicamente, pero no generan sonido en sentido fisiológico.

Cuando una onda sonora alcanza el oído, pone en vibración el tímpano. Esa vibración se transmite mediante una cadena de pequeños huesos hasta una membrana aún más sensible situada en el oído interno. Allí, la energía mecánica se transforma en señales eléctricas que el cerebro interpreta como sonido. En ese proceso, una perturbación física se convierte en experiencia subjetiva.

Las cualidades que atribuimos al sonido —grave o agudo, fuerte o débil, agradable o áspero— tienen una correspondencia directa con propiedades físicas de la onda. El tono depende de la frecuencia; la intensidad, de la amplitud; y el timbre, de la forma de la onda y de la combinación de frecuencias que la componen. Un mismo tono puede sonar distinto según el instrumento que lo produzca, porque cada fuente genera una estructura vibratoria propia.

Oscilación, frecuencia natural y resonancia

Todo sistema capaz de vibrar tiene una tendencia natural a hacerlo a determinadas frecuencias. Esta frecuencia natural depende de su forma,

tamaño, masa y elasticidad. Una cuerda larga vibra más lentamente que una corta; una estructura rígida responde de manera distinta a una flexible.
Cuando un sistema oscilante recibe una excitación periódica cercana a su frecuencia natural, la amplitud de la oscilación puede crecer de manera notable. Este fenómeno se conoce como resonancia. No requiere grandes fuerzas: basta una excitación pequeña, aplicada en el momento adecuado y de forma repetida.

La resonancia explica por qué una copa puede romperse al recibir un sonido preciso o por qué un instrumento musical amplifica ciertas notas. También explica problemas graves en estructuras técnicas. Si una vibración externa coincide con la frecuencia natural de un puente, un edificio o un ala de avión, la oscilación puede crecer hasta volverse peligrosa.
Para evitarlo, en ingeniería se recurre a sistemas de amortiguamiento, materiales elásticos o diseños que desplacen las frecuencias naturales fuera de los rangos críticos. Comprender el comportamiento ondulatorio no es solo una cuestión teórica: tiene consecuencias directas en la seguridad y el diseño de los sistemas físicos.

Vibraciones extremas: el fenómeno del flameo

Un caso particular y especialmente peligroso de vibración es el flameo, una oscilación repentina y violenta que puede destruir una estructura en muy poco tiempo. Se produce cuando las fuerzas aerodinámicas interactúan con la elasticidad del sistema de forma inestable.

El flameo se ha observado en superficies de control de aeronaves, en cables eléctricos sometidos a viento intenso y, de manera histórica, en grandes estructuras como puentes. En estos casos, la vibración no se limita a aumentar gradualmente: puede crecer de forma explosiva hasta provocar el colapso del sistema.

Por este motivo, el estudio de las vibraciones y de las ondas es una parte esencial del diseño estructural. Antes de construir un avión, un puente o una

torre, se analizan cuidadosamente sus modos de vibración y se realizan pruebas que permitan detectar posibles comportamientos inestables.

BLOQUE 2 — Sonido, oscilación, resonancia y vibración

- Onda sonora (variación de presión):

$$\Delta p(x,t) = \Delta p_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

- Intensidad sonora media (onda plana):

$$I = \frac{p_{\rm rms}^2}{\rho\, c}$$

(ρ: densidad del medio; c: velocidad del sonido)

- Nivel sonoro (dB):

$$L = 10 \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$$

- Oscilador amortiguado (modelo):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0$$

- Frecuencia natural:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

- Resonancia forzada (modelo):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0 \cos(\omega t)$$

BLOQUE 3

Clasificar las ondas: ordenar el movimiento para comprenderlo

A medida que se profundiza en el estudio de los fenómenos ondulatorios, surge la necesidad de clasificar las ondas. No para encasillarlas, sino para reconocer patrones comunes que permitan describir comportamientos muy distintos con un mismo lenguaje físico. Clasificar es, en este contexto, una forma de comprender.

Una primera distinción se basa en la periodicidad de la perturbación que origina la onda. Cuando la fuente genera oscilaciones regulares, repetidas en el tiempo,

la onda resultante es periódica. Es el caso de una cuerda excitada de forma continua, de una señal eléctrica estable o de un sonido musical sostenido. La forma de la onda se repite, y esa regularidad permite definir con precisión su frecuencia y su periodo.
Existen, sin embargo, perturbaciones que no se repiten de manera regular. En estos casos se habla de ondas no periódicas. La perturbación se produce una sola vez o de forma irregular, y cada evento puede diferir del anterior. Un golpe seco, una explosión o el empuje inicial de una ficha de dominó generan este tipo de ondas, que reciben también el nombre de pulsos. Aunque breves, estos pulsos transportan energía y obedecen a las mismas leyes físicas que las ondas periódicas.

Otra clasificación fundamental atiende a la relación entre la dirección de propagación de la onda y la dirección en la que oscila el medio. Cuando ambas coinciden, la onda es longitudinal. En este caso, las partículas del medio se desplazan hacia adelante y hacia atrás en la misma dirección en la que avanza la perturbación. El sonido en el aire o las compresiones que recorren un muelle son ejemplos característicos.

Cuando la oscilación del medio se produce en una dirección perpendicular a la de propagación, la onda es transversal. Así ocurre en una cuerda tensa que se agita verticalmente mientras la onda avanza horizontalmente, o en las olas que recorren la superficie del agua, donde las partículas suben y bajan mientras la perturbación se desplaza lateralmente. En estos casos, el movimiento local y el avance de la onda están claramente diferenciados.

Estas distinciones, aunque sencillas, permiten describir con precisión una gran variedad de fenómenos físicos. Sin embargo, existen ondas que no encajan en la experiencia cotidiana y que obligan a ampliar la perspectiva.

Ondas gravitacionales: cuando vibra el espacio-tiempo

Durante décadas, la idea de que el propio espacio pudiera vibrar parecía una consecuencia matemática más que una realidad observable. Sin embargo, la

teoría de la relatividad general formulada por Einstein describió la gravedad no como una fuerza convencional, sino como una curvatura del espacio-tiempo producida por la masa y la energía. De esa descripción se desprendía una predicción audaz: los movimientos acelerados de grandes masas deberían generar ondas gravitacionales.
Las ondas gravitacionales son perturbaciones del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. No necesitan un medio material, porque no oscilan en la materia ni en un campo electromagnético, sino en la propia geometría del universo. Cuando pasan, estiran y comprimen las distancias entre objetos de forma alternante, aunque con una intensidad extremadamente pequeña.

Estas ondas se originan en fenómenos astrofísicos de enorme violencia: la fusión de agujeros negros, la colisión de estrellas de neutrones, las explosiones de supernovas o la rotación de objetos compactos muy densos. Durante mucho tiempo, su existencia solo pudo inferirse de manera indirecta, como ocurrió con el sistema binario PSR 1913+16, en el que se observó una pérdida de energía compatible con la emisión de ondas gravitacionales.

La confirmación directa llegó cuando se lograron medir variaciones en la distancia entre objetos separados por varios kilómetros con una precisión inimaginable a escala humana. Las deformaciones relativas producidas por una onda gravitacional son del orden de una diezmilésima del tamaño de un protón. Detectarlas equivale a medir un cambio menor que el diámetro de un átomo en una distancia comparable a la que separa la Tierra del Sol.

Para ello se desarrollaron interferómetros láser de gran escala, en los que haces de luz recorren trayectorias perpendiculares y reflejan cualquier mínima variación en la longitud de sus brazos. Estos instrumentos han permitido detectar de forma directa ondas gravitacionales procedentes de eventos ocurridos a miles de millones de años luz, inaugurando una nueva forma de observar el universo.

Nuevas ventanas de observación

Las ondas gravitacionales no sustituyen a la luz ni a las ondas electromagnéticas: las complementan. Allí donde la radiación electromagnética no puede escapar —como en el interior de un agujero negro— las ondas gravitacionales sí transportan información. Gracias a ellas, la astronomía ha dejado de depender exclusivamente de lo que el universo emite en forma de luz. Los detectores terrestres, sin embargo, están limitados por vibraciones sísmicas y fluctuaciones locales, lo que restringe el rango de frecuencias observables.

Para superar esta barrera, se han concebido interferómetros espaciales formados por satélites separados por millones de kilómetros, capaces de explorar señales de baja frecuencia asociadas a sistemas binarios masivos y a procesos cosmológicos de gran escala.

Con estas herramientas, el estudio de las ondas ha trascendido el ámbito de los laboratorios y de la experiencia cotidiana para convertirse en una vía directa de conocimiento del universo. La misma idea que explica una cuerda vibrante o una ola en el agua permite ahora escuchar, por primera vez, el eco dinámico del cosmos.

BLOQUE 3 — Clasificación + ondas gravitacionales (actualizado)

- **Longitudinal / transversal (criterio):**
  (Conceptual, pero puedes fijarlo con la onda armónica anterior y la dirección de oscilación.)
- **Ondas gravitacionales: deformación ("strain")**

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

- **Señal típica (forma simplificada):**

$$h(t) = h_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

- **Interferómetro láser (cambio de fase por variación de camino):**

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda_{\text{láser}}} \Delta L$$

(factor 4π por ida y vuelta en un brazo, según configuración)

BLOQUE 4

La luz: cuando la onda se hace visible

Durante siglos, la luz fue una presencia cotidiana y, al mismo tiempo, un misterio. Permitía ver, medir el tiempo, orientarse, pero su naturaleza escapaba a una explicación sencilla. ¿Era algo que viajaba desde los objetos hasta los ojos? ¿Un flujo de partículas? ¿Una vibración invisible? La historia de la física está atravesada por esa pregunta.

Hoy sabemos que la luz es una radiación electromagnética, una forma de onda que no necesita un medio material para propagarse. Viaja a través del vacío, cruza distancias astronómicas y llega hasta nosotros como una oscilación extremadamente rápida de campos eléctricos y magnéticos acoplados entre sí. Esa oscilación es tan veloz que solo una franja muy estrecha del espectro puede ser percibida por el ojo humano.

La luz visible ocupa un intervalo reducido de frecuencias dentro del espectro electromagnético. Las sensaciones de color corresponden a distintas frecuencias: las más bajas se perciben como rojo; las más altas, como violeta. No hay colores en la luz en sí misma, sino frecuencias que el sistema visual traduce en experiencia cromática.

Desde el punto de vista físico, la luz se comporta como una onda transversal. Las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación. Esta característica explica fenómenos como la polarización, imposible de reproducir con ondas longitudinales.

Propagación, reflexión y absorción

La luz se propaga en línea recta siempre que el medio sea homogéneo. A medida que avanza, se distribuye sobre superficies cada vez mayores, por lo que su intensidad disminuye con la distancia. Cuando incide sobre un objeto, parte de la radiación puede ser absorbida y parte reflejada. La proporción entre ambos

procesos depende de la naturaleza del material y de la frecuencia de la luz incidente.

Las superficies rugosas dispersan la luz en múltiples direcciones, lo que permite que los objetos sean visibles desde distintos ángulos. Las superficies muy pulidas, en cambio, reflejan la radiación de forma ordenada, dando lugar a imágenes definidas, como ocurre en los espejos.

El color de los objetos no es una propiedad intrínseca, sino el resultado de un proceso selectivo. Un cuerpo aparece rojo porque absorbe la mayor parte de las frecuencias visibles y refleja principalmente aquellas correspondientes al rojo. Un objeto blanco refleja de manera casi uniforme todas las frecuencias del visible; uno negro, las absorbe casi por completo.

Difracción e interferencia: cuando la luz revela su naturaleza ondulatoria

Aunque la propagación rectilínea de la luz domina en la experiencia cotidiana, existen situaciones en las que su comportamiento ondulatorio se manifiesta de forma inequívoca. Cuando la luz atraviesa una rendija cuyo tamaño es comparable a su longitud de onda, el haz se abre y se deforma. Este fenómeno recibe el nombre de difracción.

Si la luz atraviesa dos rendijas próximas, las ondas procedentes de cada una se superponen. En algunos puntos se refuerzan, y en otros se cancelan parcialmente. El resultado es un patrón alterno de franjas claras y oscuras, conocido como interferencia. Este efecto no puede explicarse mediante un modelo puramente corpuscular y constituye una de las pruebas más claras del carácter ondulatorio de la luz.

La interferencia no es un fenómeno exclusivo del laboratorio. Aparece en los colores cambiantes de una burbuja de jabón o en las irisaciones de una fina película de aceite sobre el agua. En estos casos, la luz reflejada en distintas capas del material recorre caminos ligeramente diferentes y se superpone consigo misma.

La velocidad de la luz: un límite fundamental

Medir la velocidad de la luz fue durante mucho tiempo un desafío técnico y conceptual. Las primeras estimaciones se obtuvieron a partir de observaciones astronómicas; más tarde, los experimentos de laboratorio permitieron determinar su valor con gran precisión.
Hoy se sabe que la velocidad de la luz en el vacío es constante y constituye una de las magnitudes fundamentales de la física. No depende del movimiento de la fuente ni del observador, y actúa como un límite superior para la transmisión de información y energía. Esta propiedad tiene consecuencias profundas, no solo en la óptica, sino en la estructura misma del espacio y el tiempo.

En los medios materiales, la luz se propaga a menor velocidad. La interacción con la materia retrasa la propagación de la onda, y ese retraso depende de la frecuencia. Este fenómeno explica la refracción, la dispersión y muchos efectos ópticos cotidianos.

Una dualidad inevitable

A pesar de su comportamiento ondulatorio, la luz también manifiesta propiedades propias de las partículas. En ciertos experimentos, la energía luminosa se intercambia en paquetes discretos, llamados fotones. Esta dualidad no es una contradicción, sino una característica fundamental de la naturaleza: según el fenómeno observado, la luz se comporta como onda o como partícula.

La comprensión de esta dualidad marcó el inicio de la física moderna y transformó nuestra manera de entender la materia y la radiación. La luz dejó de ser solo un medio para ver el mundo y se convirtió en una herramienta para explorarlo, medirlo y, en última instancia, comprenderlo.

BLOQUE 4 — Luz y propiedades ondulatorias

- **Velocidad de la luz:**

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

- **En un medio:**

$$v = \frac{c}{n}$$

(n: índice de refracción)

- **Energía del fotón (si quieres anclar la dualidad):**

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

- **Polarización / campo (forma simple):**

$$E(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

BLOQUE 5

El espectro electromagnético: una continuidad invisible

La luz visible es solo una franja estrecha dentro de un abanico mucho más amplio. Si se ordenan todas las radiaciones electromagnéticas según su frecuencia o su longitud de onda, aparece el espectro electromagnético, una continuidad que abarca desde ondas de longitud kilométrica hasta radiaciones capaces de atravesar la materia más densa. No hay saltos bruscos ni fronteras naturales: los límites son convenciones útiles para describir comportamientos y aplicaciones.

En un extremo del espectro se sitúan las ondas de radio, caracterizadas por longitudes de onda grandes y frecuencias relativamente bajas. Son radiaciones de energía modesta, pero extraordinariamente eficaces para transportar información. Gracias a ellas se desarrollaron los primeros sistemas de comunicación inalámbrica, y aún hoy constituyen la base de la radiodifusión, la navegación, las comunicaciones aeronáuticas y los enlaces espaciales.

Las ondas de radio se propagan con facilidad a través de la atmósfera y, en determinados rangos de frecuencia, pueden reflejarse en las capas altas de la ionosfera. Este comportamiento permite comunicaciones a gran distancia sin necesidad de repetidores intermedios. A frecuencias más altas, sin embargo, la propagación se vuelve esencialmente rectilínea y exige línea de visión directa entre emisor y receptor.

Al aumentar la frecuencia, las ondas de radio dan paso a las microondas, cuya longitud de onda es menor y cuya energía es mayor. Esta región del espectro resulta especialmente adecuada para la transmisión de grandes volúmenes de información, para el radar y para la comunicación por satélite. Las microondas interactúan de manera eficaz con determinadas moléculas, en particular con el agua, lo que explica su uso en el calentamiento de alimentos y en aplicaciones industriales y científicas.

Las microondas atraviesan con facilidad materiales no conductores, pero son reflejadas por los metales. Esta propiedad permite confinar la radiación en dispositivos cerrados y dirigirla con precisión. En el ámbito científico, las técnicas basadas en microondas se emplean para estudiar la estructura de la materia, detectar objetos a distancia y medir velocidades y posiciones con gran exactitud.

Más allá se encuentra la radiación infrarroja, asociada de forma directa con la emisión de calor. Todos los cuerpos con temperatura superior al cero absoluto emiten radiación infrarroja, y la distribución de esa radiación depende de su temperatura. Aunque invisible al ojo humano, el infrarrojo puede detectarse como una sensación térmica o mediante instrumentos sensibles a esas longitudes de onda.

La radiación infrarroja permite observar objetos ocultos por la niebla o la oscuridad, analizar la composición de materiales y detectar variaciones de temperatura imperceptibles a simple vista. En astronomía, abre una ventana al estudio de regiones frías del universo; en medicina y en la industria, se ha convertido en una herramienta de diagnóstico y control.

A frecuencias aún mayores aparece la radiación ultravioleta, situada más allá del límite violeta de la luz visible. Esta radiación posee energía suficiente para provocar cambios químicos en la materia. La exposición controlada a radiación ultravioleta permite la síntesis de vitamina D en los organismos vivos, pero una exposición excesiva puede dañar tejidos y alterar estructuras celulares.

La atmósfera terrestre desempeña un papel protector fundamental al absorber la mayor parte de la radiación ultravioleta más energética procedente del Sol. Sin esa protección natural, la vida tal como la conocemos sería inviable. Al mismo tiempo, la radiación ultravioleta se utiliza de forma controlada para la esterilización de superficies y el estudio de materiales fluorescentes.

Al adentrarse en regiones de frecuencia aún más elevada se encuentran los rayos X, una radiación electromagnética altamente penetrante. Su capacidad para atravesar tejidos blandos y ser absorbida de manera selectiva por materiales densos ha convertido a los rayos X en una herramienta esencial en el diagnóstico médico y en la investigación científica.

Los rayos X se producen cuando electrones de alta energía se desaceleran bruscamente o cuando se producen transiciones electrónicas en las capas internas de los átomos. Su interacción con la materia es intensa y puede provocar ionización, por lo que su uso requiere medidas de protección adecuadas. A pesar de ello, su valor para observar el interior de estructuras opacas los hace insustituibles en múltiples campos.

En el extremo de mayor energía del espectro se sitúan las radiaciones electromagnéticas más penetrantes. Aunque comparten naturaleza con la luz y las ondas de radio, su comportamiento exige descripciones específicas debido a los efectos profundos que producen en la materia. En todos los casos, sin embargo, se trata de manifestaciones de un mismo fenómeno físico: la propagación de campos electromagnéticos en el espacio.

El espectro electromagnético no es, por tanto, una colección de radiaciones aisladas, sino una continuidad. La diferencia entre una onda de radio y un rayo

X no es de esencia, sino de escala. Comprender esta continuidad permite entender cómo una misma teoría física explica fenómenos tan dispares como una transmisión radiofónica, una imagen médica o la radiación procedente de una galaxia lejana.

BLOQUE 5 — Espectro electromagnético aplicado (radio → rayos X)

- **Relación universal del espectro EM:**

$$c = \lambda f$$

- **Energía vs. frecuencia (para "ionizante"):**

$$E = hf$$

- **Atenuación de rayos X en materia (ley exponencial):**

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

(μ: coeficiente de atenuación lineal; x: espesor)

BLOQUE 6

Interferencia, difracción y ondas estacionarias: cuando las ondas se encuentran

Cuando dos o más ondas coinciden en un mismo lugar, no se ignoran. Se superponen. En ese punto, el efecto total no es una nueva onda independiente, sino la suma de las perturbaciones individuales. Este principio, sencillo en apariencia, explica una gran variedad de fenómenos y constituye uno de los pilares del comportamiento ondulatorio.

La interferencia aparece cuando ondas de la misma naturaleza se cruzan o se solapan. Si sus oscilaciones coinciden en fase, las amplitudes se refuerzan y la perturbación resultante es mayor. Si, por el contrario, una cresta coincide con un valle, las ondas se atenúan o se anulan parcialmente. De este modo, la energía no desaparece, sino que se redistribuye en el espacio.

Este fenómeno se observa con claridad en la luz, donde da lugar a patrones de franjas claras y oscuras, pero también en el sonido, en las ondas de radio o en las olas sobre la superficie del agua. En una sala de conciertos, por ejemplo, la interferencia entre ondas sonoras puede provocar zonas donde el sonido se percibe con mayor intensidad y otras donde parece apagarse. Por esta razón, el diseño acústico de los espacios requiere un conocimiento preciso del comportamiento ondulatorio.

La difracción es otro rasgo característico de las ondas. Cuando una onda encuentra un obstáculo o atraviesa una abertura de tamaño comparable a su longitud de onda, no se limita a seguir una trayectoria rectilínea, sino que se curva y se expande. La onda parece rodear los bordes del obstáculo, extendiéndose más allá de lo que permitiría un modelo puramente geométrico.

Este comportamiento se explica considerando que cada punto del frente de onda actúa como un foco secundario que emite ondas elementales. La superposición de todas ellas da lugar a la forma final de la onda tras la abertura. Cuanto mayor es la longitud de onda en relación con el obstáculo, más acusado es el efecto de

difracción. Por eso las ondas largas, como las de radio, pueden rodear edificaciones, mientras que la luz visible produce sombras bien definidas.

Interferencia y difracción no son fenómenos independientes. En realidad, la difracción puede entenderse como un caso particular de interferencia entre las ondas secundarias generadas al atravesar una rendija u orificio. Ambos efectos revelan, de forma directa, la naturaleza ondulatoria de la perturbación.

Ondas estacionarias: vibración sin avance

En determinadas condiciones, la superposición de ondas puede producir un efecto singular: la formación de ondas estacionarias. Esto ocurre cuando dos ondas de igual frecuencia y amplitud se propagan en sentidos opuestos por un mismo medio. En lugar de avanzar, el patrón resultante permanece fijo en el espacio.

En una onda estacionaria aparecen puntos que no vibran, llamados nodos, y regiones donde la oscilación alcanza su máxima amplitud, denominadas vientres. Entre dos nodos consecutivos, el sistema oscila de forma coherente, pero el patrón global no se desplaza.

Este fenómeno se observa fácilmente en una cuerda sujeta por un extremo. La onda generada al agitarla se refleja y vuelve en sentido contrario. La interferencia entre la onda incidente y la reflejada da lugar a un conjunto estable de nodos y vientres. La distancia entre nodos está relacionada con la longitud de onda y determina las frecuencias posibles de vibración.

Las ondas estacionarias explican el funcionamiento de los instrumentos musicales de cuerda y de viento. Una cuerda de violín puede vibrar como un todo, produciendo el tono fundamental, o dividirse en segmentos más pequeños, generando armónicos. Todos estos modos de vibración coexisten y dan lugar a la riqueza sonora del instrumento.

Un lenguaje común para fenómenos distintos

Los mismos principios que describen una cuerda vibrante permiten comprender fenómenos mucho más complejos. En la física moderna, la estructura de los átomos se explica mediante modelos en los que los electrones solo pueden ocupar determinados estados, análogos a ondas estacionarias. La materia, al igual que la luz, presenta propiedades ondulatorias que se manifiestan a escalas microscópicas.

Así, el estudio de las ondas no se limita a un conjunto de ejemplos aislados. Constituye un lenguaje unificador que conecta la experiencia cotidiana con los procesos más profundos de la naturaleza. Desde el sonido que percibimos hasta las señales que llegan del espacio profundo, el comportamiento ondulatorio aparece una y otra vez como una clave fundamental para entender el mundo físico.

Al final del recorrido, la idea inicial se reafirma: una onda no transporta materia, sino información y energía. Es el rastro de una perturbación que avanza, deja huella y desaparece, permitiendo que sistemas muy distintos se comuniquen sin tocarse. Comprender las ondas es, en última instancia, comprender cómo el universo transmite sus cambios.

BLOQUE 6 — Interferencia, difracción y ondas estacionarias

- **Superposición:**

$$y_{\text{tot}} = y_1 + y_2$$

- **Interferencia (dos ondas coherentes, intensidad):**

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\phi$$

- **Doble rendija (máximos):**

$$d\sin\theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm1, \pm2, \dots)$$

- **Rendija simple (mínimos):**

$$a\sin\theta = m\lambda \quad (m = \pm1, \pm2, \dots)$$

- **Onda estacionaria (suma de dos ondas opuestas):**

$$y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)$$

- **Cuerda fija en ambos extremos (modos):**

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \qquad f_n = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

CIERRE

Desde una ficha de dominó que cae hasta una señal procedente de la fusión de dos agujeros negros, el mismo concepto atraviesa escalas, disciplinas y tecnologías. El estudio de las ondas ofrece una visión coherente del movimiento, de la energía y de la información, y constituye una de las herramientas más poderosas de la física

Bibliografía

1. *Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Physical Review Letters, 116(6), 061102. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102*

2. *Carroll, S. M. (2019). Spacetime and geometry: An introduction to general relativity (2nd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108770385*

3. *Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2011). The Feynman lectures on physics (Vols. I–II). Basic Books. (Edición moderna de las conferencias clásicas; ondas, electromagnetismo y luz).*

4. *Griffiths, D. J. (2017). Introduction to electrodynamics (4th ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108333511*

5. *Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). Fundamentals of physics (11th ed.). Wiley.*

6. *Hecht, E. (2017). Optics (5th ed.). Pearson Education.*

7. *Maggiore, M. (2018). Gravitational waves: Volume 1. Theory and experiments. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780198570745.001.0001*

8. *Maggiore, M. (2018). Gravitational waves: Volume 2. Astrophysics and cosmology. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780198570899.001.0001*

9. *Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (2017). Gravitation. Princeton University Press. (Reimpresión moderna del clásico fundamental de relatividad general).*

10. *Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2019). Fundamentals of photonics (3rd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119506874*

11. *Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). Physics for scientists and engineers (9th ed.). Cengage Learning.*

12. *Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). Physics for scientists and engineers (6th ed.). W. H. Freeman.*

13. *Young, H. D., & Freedman, R. A. (2016). University physics with modern physics (14th ed.). Pearson Education.*



Xavier Pardell

DOI:10.13140/RG.2.2.20396.32641